减少矿物质元素的饲粮中补充包膜半胱胺对育肥猪生长性能、胴体品质、组织矿物质元素沉积及粪便矿物质元素排放的影响

白苗苗[1,2] 刘红南[2,3] 张旺宏[2] 张晓峰[4] 徐 康[2] 刁欠云[1] 邓近平[1] 印遇龙[1,2]

（1. 华南农业大学动物科学技术学院，广州 510642；2.中国科学院亚热带农业生态所，动物营养代谢过程与生理调控实验室，亚热带农业生态过程重点实验室，湖南省畜禽健康养殖工程技术中心，长沙 410125；3.湖南畜禽安全生产协同创新中心，湖南 410128；4.杭州康德权饲料有限公司，杭州 311107）

摘 要：本试验旨在研究夏季高温状态下，在减少矿物质（铜、铁、锰、锌）元素的饲粮中补充包膜半胱胺对育肥后期猪生长性能、胴体品质、组织矿物质元素沉积和粪便矿物质元素排放的影响。试验共选用 360 头健康、平均体重为（103.9±0.7） kg 的三元（杜×长×大）杂交育肥猪，采用 2×2 双因素试验设计，分为 4 组，每组 6 个重复，每个重复 15 头。因素 1 为饲粮矿物质元素的含量，设计为基础饲粮铜、铁、锌、锰元素含量的 100%和 80% 2 个水平；因素 2 为饲粮包膜半胱胺（半胱胺含量 27%）含量，设计为 0、1 600 mg/kg（半胱胺含量 300 mg/kg）2 个水平。试验期 30 d。结果表明：1）饲粮减少矿物质元素或补充包膜半胱胺对育肥猪后期的生长性能和胴体品质均无显著影响（P>0.05）。2）饲粮减少矿物质元素可显著降低育肥猪肝脏中铬元素的含量及肾脏中钠、钙、铅元素的含量（P<0.05），显著升高血清钠元素含量（P<0.05）；减少矿物质元素的饲粮中补充包膜半胱胺显著或极显著降低肝脏中钾元素含量和肾脏中钠、钙、铅、铜元素含量（P<0.05 或 P<0.01），并有降低肝脏锰、锌、铬及钙元素和血清中铬和镁元素含量沉积的趋势（0.05≤P<0.10），对维持机体各组织中钠元素的稳定有利。3）饲粮中减少矿物质元素或补充包膜半胱胺极显著减少粪便中铅和铜元素的排放量（P<0.01）;饲粮减少矿物质元素可显著降低粪便中锌元素的排放量（P<0.05），极显著升高镁元素的排放量（P<0.05）;减少矿物质元素的饲粮中补充包膜半胱胺对粪便中铬元素的排放量有降低趋势（0.05≤P<0.10）。由此可见，夏季高温期，在饲粮的铜、铁、锰、

锌 4 种矿物质元素含量减少 20%条件下补充 1 600 mg/kg 包膜半胱胺，能在不影响育肥猪后期生长性能和胴体品质的同时，降低血清、肝脏和肾脏中矿物质元素的沉积，减少粪便铅、铜和铬元素对环境的排放，维持机体电解质平衡。

关键词：矿物质元素；包膜半胱胺；育肥猪；生长性能；沉积；排放

中图分类号：S828

矿物质元素，如铜、铁、锰、锌等是动物生长发育过程中必不可少的生命元素，参与机体多项生理生化反应活动[1]。矿物质元素的添加量根据养殖环境的地域、生产条件、管理、生猪生长阶段以及自身生理状况、季节等多种因素确定[2-3]。研究发现，饲粮中通过添加高剂量矿物质元素，如铜和锌，可以显著提高猪的平均日增重（ADG）和平均日采食量（ADFI），降低料重比（F/G），进而提高猪场经济效益[4]。然而，猪对铜、锌等重金属元素利用率较低，生长猪饲料中 70%~95%的铜元素随粪便排出体外，育肥猪对铜元素的利用率仅为 5%~10%, 锌元素为 30%~60%，大部分重金属元素随粪便排出，使土壤和水中重金属含量升高，造成严重环境污染[5-6]。畜禽养殖对环境的污染是制约其发展的重要因素，高效可持续发展的畜牧业须要从养殖生产的源头降低饲粮中矿物质元素的使用量。

应激是畜禽生产过程中常常遇到的、且不可避免的问题，它对畜禽生长性能造成严重的影响。动物自身的遗传因素和外界环境（如温度、噪音、传染病、污染物等）都会引起应激[7]。生长育肥猪最适生长温度为 18~21 ℃，而我国北方地区夏季平均最高气温可达到 30 ℃以上，夏季高温会导致畜禽产生热应激，温度过高使动物的生长性能降低、内分泌系统紊乱。尽管有些应激无法避免，但我们可以采取有效措施或采用某些抗应激剂来缓解应激，将危害降到最小。半胱胺（cysteamine，CS）是一类生物活性物质，对维持机体正常的生理活动具有重要的作用[8-9]。在应激状态下，半胱胺可以整合机体生理状况，通过调节自身内分泌激素的分泌（如糖皮质激素、肾上腺皮质激素等），平衡机体内分泌水平，消除应激对机体造成的损伤[10]。半胱胺无种属特异性，使用安全无残留，在畜牧业生产中可以作为一种优良

的促生长和抗应激剂，具有较好的发展前景。包膜半胱胺（coated cysteamine，CC）克服了半胱胺易被氧化的缺点，采用微胶囊包衣技术，在实际生产和应用中更易保存。在吸收中过胃肠溶，具有高生物学利用率。

本试验旨在我国北方夏季高温条件下，在饲粮中减少 20%铜、铁、锰、锌 4 种矿物质元素并补充适量 CC，探究其对育肥猪生长性能、胴体品质、组织矿物质元素沉积和粪便矿物质元素排放的影响。

1　材料与方法

1.1　试验饲粮和试验设计

基础饲粮配制参照 NRC（2012）推荐的 80~120 kg 育肥猪营养需要。本试验以玉米-豆粕为基础，结合猪场实际和试验需求设计配方并配制基础饲粮。

选取 360 头平均体重[（103.9±0.7） kg]相近的三元（杜×长×大）杂交健康育肥猪，公母各占 1/2，采用 2×2 双因素试验设计，随机分为 4 组，每组 6 个重复，每个重复 15 头猪。因素 1 为饲粮矿物质元素的含量，设计为基础饲粮铜、铁、锌、锰元素含量的 100%和 80% 2 个水平；因素 2 为饲粮 CC（半胱胺含量 27%，由杭州康德权饲料有限公司提供）含量，设计为 0、1 600 mg/kg（半胱胺含量 300 mg/kg）2 个水平。试验饲粮组成及营养水平见表 1。预试期 3 d，正试期 30 d。

表 1　试验饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets（DM basis）　　%

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME	
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC
原料 Ingredients				
玉米 Corn	69.64	69.62	69.69	69.66
豆粕 Soybean meal	11.51	11.51	11.52	11.52
小麦胚 Wheat germ	10.00	10.00	10.00	10.00

麸皮 Wheat bran	6.00	6.00	6.00	6.00
石粉 Limestone	0.93	0.93	0.93	0.93
磷酸氢钙 $CaHPO_4$(16.5%)	0.51	0.51	0.51	0.51
食盐 NaCl	0.36	0.36	0.36	0.36
预混料 Premix1)	0.75	0.75	0.75	0.75
矿物质预混料 Mineral premix2)	0.30	0.30	0.24	0.24
包膜半胱胺 CC		0.03		0.03
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels3)				
消化能 DE/(MJ/kg)	13.10	13.30	13.30	13.30
粗蛋白质 CP	15.00	15.00	15.00	15.00
粗灰分 Ash	3.99	3.99	3.99	3.99
粗纤维 CF	2.70	2.70	2.70	2.70
粗脂肪 EE	3.46	3.46	3.46	3.46
中性洗涤纤维 NDF	9.50	9.50	9.50	9.50
酸性洗涤纤维 ADF	3.44	3.44	3.44	3.44
钙 Ca	0.56	0.56	0.56	0.56
铜 Cu/(mg/kg)	3.00	3.00	2.40	2.40
铁 Fe/(mg/kg)	39.00	39.00	31.20	31.20
锰 Mn/(mg/kg)	2.10	2.10	1.70	1.70
锌 Zn/(mg/kg)	40.00	40.00	32.00	32.00
总磷 TP	0.52	0.52	0.52	0.52
可利用磷 AP	0.27	0.27	0.27	0.27
标准回肠可消化氨基酸 SID amino acids				
赖氨酸 Lys	0.80	0.80	0.80	0.80
苏氨酸 Thr	0.50	0.50	0.50	0.50
色氨酸 Trp	0.14	0.14	0.14	0.14
精氨酸 Arg	0.83	0.83	0.83	0.83
异亮氨酸 Ile	0.48	0.48	0.48	0.48
亮氨酸 Leu	1.13	1.13	1.13	1.13
缬氨酸 Val	0.59	0.59	0.59	0.59
蛋氨酸 Met	0.27	0.27	0.27	0.27
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.48	0.48	0.48	0.48

1)每千克预混料含有 One kg of premix provided the following:VA 10 400 000 IU，VD_3 300 000 IU，VE 2 800 IU，VK_3 400 mg，VB_1 400 mg，VB_2 880 mg，VB_6 480 mg，VB_{12} 3 mg，烟酸 niacin 2 g，叶酸 folic acid 160 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 2 g，生物素 biotin 16 mg，$Ca(IO_3)_2$ 15 mg，Na_2SeO_3 15 mg，$MgSO_4$ 0.27 mg，抗氧化剂 antioxidants 500 mg。

2)矿物质预混料由山东新希望六和股份有限公司提供。Mineral element premix was provided by *Shandong* Newhope-*Liuhe* Group Co., Ltd..

3)计算值 Calculated values。

1.2 饲养管理

试验于山东某育肥猪场开展，采用圈养式。每天清洗代谢笼及地面，猪舍每周喷雾消毒1 次。每天观察猪的健康状况并记录。试验全程采用颗粒料饲喂，自由采食和饮水。为贴近实际养殖环境，畜舍温度无人为控制，试验期具体温湿度见图 1。

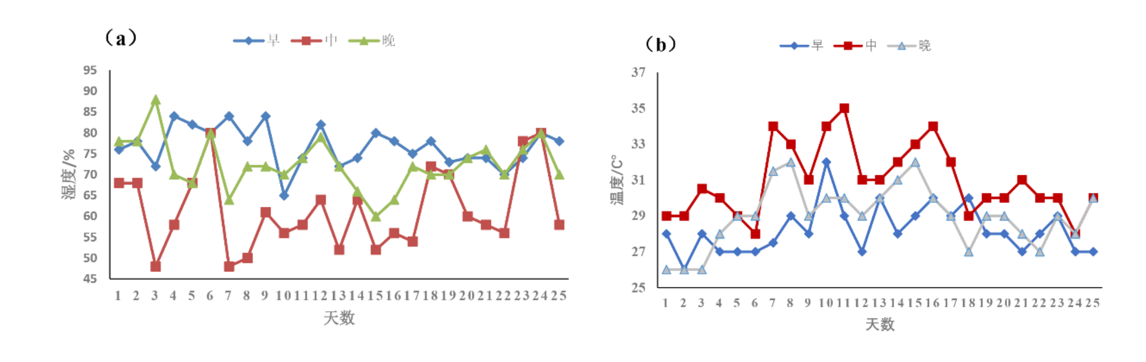


图 1 试验期间猪舍温度（a）和湿度（b）的变化

Fig.1 The changes of temperature (a) and humidity (b) in pigpen during the test

1.3 样品的采集与处理

试验期第 30 天 18:00 断料，于次日 08:00 从每组中随机选取 6 头进行前腔静脉采血并分离血清，将育肥猪运送至当地屠宰场进行屠宰和组织样品采集用于后续分析。胴体性状用左半个胴体来分割和检测。

1.4 指标测定及其方法

1.4.1 生长性能

试验猪分别于正试期开始、结束当天 08:00 空腹称重。每次投料前先称料重，每隔 7 d对剩料进行收集并称重，统计各组猪的采食量。饲养试验结束后，计算各组 ADG、ADFI和 F/G。

1.4.2 胴体品质

饲养试验结束后，分别从每组中挑选 6 头体重相近的试验猪，准确记录其宰前活重（空

腹 12 h 后重），进行屠宰。育肥猪屠宰后打开腹腔，分离肝脏和肾脏，称重并记录数据。

脏器指数（g/kg）=脏器绝对重量/体重。

根据我国《瘦肉型种猪性能测定技术规程》（GB8467-1987）分别测定猪胴体重（屠宰放血后，剥去毛皮、头、内脏及前肢膝关节和后肢趾关节以下部分）、眼肌面积（倒数第 3~4 肋骨间背最长肌横截面长×宽×0.7）、背膘厚（肩部最厚处、胸腰椎结合处和腰荐椎结合处 3 点的背膘厚平均值），并对左半胴体进行骨肉和皮脂剥离，测定瘦肉率等性状。

屠宰率（%）=（胴体重/宰前活重）×100。

1.4.3 组织矿物质元素含量

取肝脏、肾脏及骨各 20 g 鲜样，经 20 h 冷冻干燥、粉碎处理后，105 ℃烘干 6 h，待用。

按 GB/T 13885-2003 方法，取样品（分别准确称取 0.5 g 肝脏、肾脏及猪骨的烘干样品于锥形瓶中，量取 0.5 mL 血清样品于锥形瓶中）加入 10 mL 浓硝酸-高氯酸(体积比为 4:1)混合液，盖上玻璃漏斗回流，室温消化过夜，再在电热板上进行热消化处理：80 ℃ 0.5 h；120 ℃ 0.5 h；220 ℃至有白烟产生，温度升高至 260 ℃直至蒸干无液滴流动，用 1%硝酸溶液溶解沉淀，加热至澄清，并用 1%硝酸定容至 100 mL，混合均匀，过滤后溶液用安捷伦电感耦合等离子体质谱仪（ICP-OES）上机测定铜、铁、锰、锌、镁、钾元素含量。

1.4.4 粪中矿物质元素含量

正试期开始后每周（第 7 天、第 14 天、第 21 天和第 28 天）固定时间（10：00）对各组进行粪便采集，每个重复收集 2~3 头猪排泄的新鲜粪便进行混合并称重，105 ℃烘干 6 h，粉碎后进行矿物质元素含量测定，方法 1.4.3。

1.5 数据统计与分析

试验数据通过 Excel 2016 软件进行初步处理，再采用 SPSS 23.0 统计软件进行双因素方差分析（two-way ANOVA），以 P<0.05 为差异显著，P<0.01 为差异极显著，0.05≤P<0.10 表示有显著性趋势。

2 结 果

2.1 CC 在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪生长性能和胴体品质的影响

由表 2、表 3 可知，饲粮减少矿物质元素或补充 CC 对育肥猪的生长性能和胴体品质均无显著影响（*P*>0.05）。饲粮减少矿物质元素与补充 CC 对育肥猪的肝脏指数有显著的互作效应（*P*<0.05）。

表 2 包膜半胱胺在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪生长性能的影响

Table 2 Effects of CC on growth performance of finishing pigs fed reduced ME diet

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME		SEM	*P* 值 *P*-values		
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC		矿物质元素 ME	包膜半胱胺 CC	矿物质元素×包膜半胱胺 ME×CC
始重 Initial weight/kg	103.20	103.54	104.23	104.94	3.04	0.25	0.84	0.74
末重 Final weight/kg	115.63	116.17	114.69	115.71	2.91	0.38	0.84	0.81
平均日增重 ADG/（kg/d）	0.95	0.98	0.93	0.93	0.03	0.58	0.99	0.65
平均日采食量 ADFI（kg/d）	2.94	2.98	2.99	3.03	0.08	0.80	0. 57	0.54
料重比 F/G	2.90	2.96	2.96	3.02	0.06	0.52	0.47	0.99

表 3 包膜半胱胺在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪胴体品质的影响

Table 3 Effects of CC on carcass quality of finishing pigs fed reduced ME diet

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME		SEM	*P* 值 *P*-values		
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC		矿物质元素 ME	包膜半胱胺 CC	矿物质元素×包膜半胱胺 ME×CC
肝脏指数 Hepatic index/（g/kg）	22.06	29.32	21.38	25.75	2.40	0.55	0.13	0.01
肾脏指数 Kidney index/（g/kg）	42.18	40.55	51.92	43.69	4.13	0.31	0.43	0.78
背膘厚 Backfat thickness/mm	14.36	13.15	13.00	14.49	0.30	0.68	0.39	0.68
眼肌面积 Loin muscle area/cm^2	69.01	69.21	71.06	64.21	3.34	0.76	0.51	0.59
屠宰率 Dressing percentage/%	3.35	2.83	3.27	2.89	0.17	0.97	0.10	0.48
瘦肉率 Lean percentage/%	69.18	68.75	65.06	70.49	1.94	0.98	0.74	0.32

2.2 CC 在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪组织矿物质元素沉积的影响

由表 4 可知，饲粮减少矿物质元素显著升高血清中钠元素的含量（*P*<0.05）。减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 有降低血清中镁、铬元素含量的趋势（0.05≤*P*<0.10）。饲粮减少矿

物质元素或补充 CC 对血清中其他元素的含量均无显著影响（$P>0.05$）。

表 4　包膜半胱胺在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪血清矿物质元素含量的影响

Table 4　Effects of CC on serum mineral contents of finishing pigs fed reduced ME diet　μg/mL

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME		SEM	*P* 值 *P*-values		
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC		矿物质元素 ME	包膜半胱胺 CC	矿物质元素×包膜半胱胺 ME×CC
钾 K	294.97	287.97	309.31	313.16	10.36	0.20	0.92	0.72
钠 Na	2 360.21	2 314.53	2 409.46	2 547.38	40.08	0.03	0.43	0.13
钙 Ca	548.58	439.51	537.04	536.48	23.01	0.21	0.12	0.12
磷 P	120.38	116.74	122.11	117.50	5.97	0.89	0.63	0.96
镁 Mg	65.20	54.15	62.14	59.75	2.56	0.73	0.09	0.25
铬 Cr	1.61	1.03	1.69	1.16	0.20	0.72	0.07	0.93
镉 Cd	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.20	0.52	0.52
铅 Pb	0.34	0.25	0.35	0.25	0.08	0.96	0.43	0.99
铜 Cu	5.18	4.56	5.32	5.69	0.23	0.07	0.71	0.15
铁 Fe	25.87	22.94	31.56	30.30	3.24	0.18	0.66	0.86
锰 Mn	0.72	0.52	0.74	0.66	0.06	0.37	0.11	0.49
锌 Zn	9.64	6.24	8.63	8.34	0.76	0.62	0.11	0.17

由表 5 可知，饲粮减少矿物质元素显著降低肝脏中铬元素的含量（$P<0.05$），钙、钠、磷元素含量有降低趋势（$0.05\leq P<0.10$）。在减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 显著降低肝脏中钾元素含量（$P<0.05$），显著提高了肝脏中镉元素含量（$P<0.05$），铬、锰、锌元素有降低的趋势（$0.05\leq P<0.10$）。

表 5　包膜半胱胺在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪肝脏矿物质元素含量的影响

Table 5　Effects of CC on liver mineral contents of finishing pigs fed reduced ME diet　mg/kg

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME		SEM	*P* 值 *P*-values		
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC		矿物质元素 ME	包膜半胱胺 CC	矿物质元素×包膜半胱胺 ME×CC
钾 K	9 527.08	9 129.04	9 611.07	8 622.95	200.65	0.50	0.04	0.35
钠 Na	3 234.55	3 200.80	3 072.53	2 880.43	30.41	0.08	0.40	0.55
钙 Ca	1 121.62	1 117.63	1 121.46	776.73	3 003.04	0.05	0.05	0.05
磷 P	12 086.38	12 005.15	11 939.16	11 082.32	504.49	0.07	0.11	0.18
镁 Mg	883.55	854.67	887.85	841.13	159.58	0.57	0.15	0.31
铬 Cr	23.79	21.61	19.99	11.91	0.34	0.03	0.09	0.31
镉 Cd	0.11	0.13	0.11	0.14	0.01	0.49	0.04	0.55

铅 Pb	0.49	0.40	0.43	0.32	0.02	0.60	0.41	0.93
铜 Cu	50.64	55.14	62.32	47.35	0.26	0.82	0.54	0.26
铁 Fe	534.65	491.91	490.22	517.32	17.93	0.84	0.87	0.46
锰 Mn	14.01	13.21	13.67	12.04	0.22	0.25	0.07	0.52
锌 Zn	403.03	331.47	356.02	296.94	7.43	0.20	0.05	0.84

由表 6 可知，饲粮减少矿物质元素显著降低肾脏中钠、钙元素的含量（P<0.05）。减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 极显著降低了肝脏中钠、钙元素含量（P<0.01）。饲粮减少矿物质元素或补充 CC 对肝脏中铅和铜元素的含量有显著或极显著的交互作用（P<0.05 或 P<0.01），饲粮减少矿物质元素显著降低肾脏中铅元素的含量（P<0.05），对铜元素含量无显著影响（P>0.05）；减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 极显著降低肾脏中铅元素的含量（P<0.01），显著降低铜元素的含量（P<0.05）。

表 6 包膜半胱胺在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪肾脏矿物质元素含量的影响

Table 6 Effects of CC on nephritic mineral contents of finishing pigs fed reduced ME diet mg/kg

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME		SEM	P 值 P-values		
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC		矿物质元素 ME	包膜半胱胺 CC	矿物质元素×包膜半胱胺 ME×CC
钾 K	12 001.99	11 469.71	11 891.55	12 002.31	170.16	0.39	0.39	0.20
钠 Na	7 527.69	6 730.72	6 899.56	6 349.74	131.36	0.01	<0.01	0.51
钙 Ca	1 838.75	1 585.53	1 743.92	1 392.13	47.29	0.04	<0.01	0.47
磷 P	12 703.50	12 265.86	12 561.37	12 436.02	140.90	0.95	0.17	0.44
镁 Mg	1 013.33	1 013.29	1 010.84	974.93	9.24	0.13	0.18	0.19
铬 Cr	1.63	1.51	1.31	1.25	0.15	0.19	0.68	0.88
镉 Cd	0.95	1.08	1.01	0.96	0.07	0.75	0.64	0.36
铅 Pb	1.77	0.31	0.70	0.69	0.10	0.02	<0.01	<0.01
铜 Cu	59.13	55.75	74.91	47.56	3.82	0.49	0.01	0.04
铁 Fe	613.16	560.11	267.93	344.28	140.90	0.18	0.95	0.75
锰 Mn	11.18	11.61	10.83	9.77	0.59	0.21	0.71	0.38
锌 Zn	163.79	167.68	173.79	165.87	6.54	0.66	0.83	0.53

由表 7 可知，饲粮减少矿物质元素对猪骨骼中镉元素的含量有降低趋势（0.05≤P<0.10）。减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 对猪骨骼中钠元素含量有降低趋势（0.05≤P<0.10）。饲粮减少矿物质元素与补充 CC 对骨骼中钾元素的含量具有显著的交互作用（P<0.05）。

表 7 包膜半胱胺在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪骨骼矿物质元素含量的影响

Table 7 Effects of CC on skeleton mineral contents of finishing pigs fed reduced ME diet mg/kg

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME		SEM	P 值 P-values		
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC		矿物质元素 ME	包膜半胱胺 CC	矿物质元素×包膜半胱胺 ME×CC
钾 K	2 807.16	3 151.77	3 110.10	2 125.88	200.65	0.22	0.27	0.03
钠 Na	2 752.73	2 606.62	2 751.88	2 716.35	30.41	0.22	0.05	0.21
钙 Ca	46 329.34	46 867.17	46 957.21	35 472.38	3 003.04	0.22	0.21	0.17
磷 P	8 162.44	8 333.73	8 323.15	6 351.00	504.49	0.22	0.22	0.15
镁 Mg	2 425.14	2 325.84	2 394.10	2 021.35	159.58	0.47	0.31	0.55
铬 Cr	1.41	1.42	2.22	1.39	0.34	0.43	0.41	0.40
镉 Cd	0.09	0.08	0.07	0.05	0.01	0.06	0.41	0.76
铅 Pb	0.25	0.28	0.25	0.24	0.02	0.49	0.82	0.53
铜 Cu	2.53	2.58	2.52	3.01	0.26	0.57	0.47	0.55
铁 Fe	41.84	97.67	52.17	36.06	17.93	0.32	0.44	0.17
锰 Mn	0.76	0.92	0.90	1.49	0.22	0.27	0.25	0.51
锌 Zn	120.48	116.00	116.23	93.42	7.43	0.22	0.21	0.39

2.3 CC 在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪粪便矿质元素排放量的影响

由表 8 可知，饲粮减少矿物质元素使粪便中铜元素的排放量极显著降低（$P<0.01$），锌元素排放量显著降低（$P<0.05$）。减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 使粪便中铜元素的排放量极显著降低（$P<0.01$）。饲粮减少矿物质元素与补充 CC 对粪便中镁、铬、铅元素的排放量有显著或极显著的互作效应（$P<0.05$ 或 $P<0.01$）。

表 8 包膜半胱胺在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪粪便矿物质元素排放量的影响

Table 8 Effects of CC on fetal mineral excretion of finishing pigs fed reduced ME diet mg/kg

项目 Items	100%矿物质元素 100% ME		80%矿物质元素 80% ME		SEM	P 值 P-values		
	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC	0 mg/kg 包膜半胱胺 0 mg/kg CC	300 mg/kg 包膜半胱胺 300 mg/kg CC		矿物质元素 ME	包膜半胱胺 CC	矿物质元素×包膜半胱胺 ME×CC
钙 Ca	1 770.01	1 756.57	1 709.54	1 763.55	39.27	0.64	0.72	0.55
镁 Mg	1 095.34	1 123.19	1 209.46	1 146.70	9.88	<0.01	0.23	0.01
铬 Cr	1 195.06	1 331.34	1 241.09	1 215.29	20.31	0.24	0.08	0.01
镉 Cd	0.41	0.50	0.69	0.75	0.10	0.07	0.58	0.93
铅 Pb	268.95	184.28	173.89	177.38	7.33	<0.01	<0.01	<0.01
铜 Cu	85.13	77.87	78.33	71.43	0.82	<0.01	<0.01	0.88
铁 Fe	191.56	177.38	183.89	198.55	8.45	0.58	0.98	0.25
锰 Mn	32.91	30.62	34.63	34.03	0.99	0.09	0.32	0.56
锌 Zn	0.78	0.54	0.18	0.37	0.09	0.01	0.87	0.10

3 讨 论

因品种、体重、生长阶段和饲养环境等的差异，猪生长发育所需的矿物质元素的添加量也不同。调查表明，饲料中 95%以上的铜、锌元素不能被畜禽消化吸收，随粪便排出体外，直接给生态环境造成严重污染。此外，随着饲料中铜、锌元素添加量的升高，粪便中铜、锌元素的排放量也呈递增趋势[11]。结合目前国内养猪现状，猪粪中铜元素的平均含量高达 830 mg/kg，锌元素的平均含量为 1 064 mg/kg[12]。不同地区均存在粪便重金属超标问题，表明在实际生产过程中饲粮中矿物质元素过量添加。研究发现，在 NRC(2012)对矿物质元素需要量标准的基础上降低 50%对猪的生长性能没有影响[13]。为促进我国规模化养殖业的可持续发展，本试验旨在研究夏季高温条件下，在降低 20%矿物质元素含量的饲粮中补充功能性饲料添加剂 CC，探究其对育肥猪生长性能、机体各组织矿物质元素沉积和粪便矿物质元素排放的影响，为畜禽废弃物污染治理和肉食品安全生产提供理论参考依据。

3.1 CC 在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪生长性能和胴体品质的影响

饲料成本占整个生猪产业成本的 65%，在维持畜禽正常生长发育的同时，降低饲料成本将大大提高生猪养殖效益。在育肥后期，猪的采食量最高，F/G 相对较高。研究发现，屠宰前 40 d 不饲喂矿物质元素，对育肥猪的生长性能和胴体品质均无影响[14]。饲粮中减少或者停止饲喂微量矿物质元素对育肥猪的眼肌面积和背膘厚无显著影响[15]。这与本试验结果相符，饲粮中减少 20%铜、铁、锰、锌 4 种矿物质元素的含量对育肥后期猪的生长性能和胴体品质无显著影响。有研究发现，猪长期饲喂无微量矿物质元素饲粮显著提高了 ADFI 和背膘厚[16]，有降低 ADG 的趋势[17]。在应激状态下，减少或者出栏前 4 周停止添加育肥猪饲粮中微量矿物质元素的，显著降低了 ADG，提高了 F/G[18]。本试验发现，在夏季高温期，减少 20%铜、铁、锰、锌 4 种矿物质元素对 ADG 和 F/G 并未造成显著影响，可能与实际猪场的管理条件有关。

半胱胺能有效降低体内生长抑素（somatostatin，SS）免疫活性，进而促进生长激素等

多种促生长类激素的分泌，改善营养物质消化和吸收，促进畜禽生长[19]。McLeod 等[20]研究发现 SS 被抑制的强弱由半胱胺添加剂量和时间决定，若连续添加大剂量半胱胺会诱发胃肠溃疡。饲粮中添加高剂量的半胱胺对育肥猪生长性能无影响[21]。本试验结果表明饲粮补充 CC 对育肥猪的生长性能无影响。除此之外，饲喂半胱胺对脏器发育无显著影响。有研究发现，饲粮中减少矿物质元素的添加量还可以显著提高育肥猪肝脏和肾脏重量[22]。本试验结果表明，饲粮减少矿物质元素与补充 CC 对肝脏指数存在显著的互作效应，这与文献报道的结果并不一致，推测与不同品种猪脏器的差异有关。

3.2 CC 在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪组织矿物质元素沉积的影响

矿物质元素是维持畜禽正常生长发育和新陈代谢必不可少的营养物质。不同组织因其功能不同而其元素含量也各不相同，肝脏是主要的矿物质元素沉积器官，钠、钾元素主要存在于体液和软组织中[23]。食物和肠道中矿物质元素比例关系的变化影响体内矿物质元素的稳定[24]。长期超剂量或低剂量饲喂铜、铁、锰、锌等矿物质元素，势必会影响畜禽正常生理机能及改变畜禽肉产品的残留[16,25-26]。饲粮中不添加矿物质元素对生长肥育猪肝脏中铜元素的沉积无显著影响，骨中铜元素的含量升高[22]。本试验中减少饲粮矿物质元素含量并未发现育肥猪骨中铜元素含量降低。机体内具有复杂的转运和调节系统来维持内环境各金属元素的稳定[27]。铜元素在肝脏中的沉积量随饲料添加量的升高呈线性上升[28]。饲粮中减少 20%铜、铁、锰、锌元素含量，造成肝脏中钠、钙、磷元素的含量都有降低趋势，铬元素的含量显著降低，然而通过补充 CC 对肝脏钾、锰和锌元素的沉积都有降低效果，但造成镉残留升高。

矿物质元素在机体组织内保持动态平衡，1 种元素含量的改变就会引起其他元素含量的改变。矿物质元素在不同组织器官中周转代谢速度也不相同。在代谢过程中，矿物质元素之间存在复杂的拮抗关系。本试验结果表明，饲粮减少 20%铜、铁、锰、锌元素含量或补充 CC 显著或极显著降低育肥猪肾脏中钠、钙和铅元素的沉积；减少矿物质元素饲粮显著提高

血清中钾离子含量，对其他元素的含量均无显著影响。有研究发现，热应激状态下减少饲粮中矿物质元素的含量，生长猪血清中锌元素的含量降低，铜元素含量无显著变化[29]。

半胱胺作为一种生理活性物质，具有重要的内分泌调节功能[30]。本试验结果显示，减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 显著降低肾脏中铜元素的沉积，推测半胱胺可以增加铜元素在转运吸收过程中所需的含硫氨基酸含量，促进细胞对铜元素的摄取[24]。热应激状态下，血液中钠与钾元素比例失衡，酸碱平衡发生紊乱，机体组织的抗氧化能力降低，导致细胞膜受损。半胱胺的强还原性使机体总抗氧化能力提高，保护细胞膜的完整性[10]。研究发现，半胱胺能够调节机体内肾上腺皮质激素和盐皮质激素分泌，盐皮质激素可以促进肾小管和集合管对钠离子的重吸收，排出钾离子和氢离子。本研究证明，减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 可以弥补由于减少矿物质元素导致的各组织内钠和钾元素含量降低的部分，维持血液内电解质的平衡。

矿物质元素及其配体在机体的抗氧化系统和免疫机制调解过程中具有重要的作用。本试验发现，减少矿物质元素的饲粮中补充 CC 促进育肥猪肝脏、肾脏中铁元素的沉积。铁元素是构成机体血红蛋白、肌红蛋白、细胞色素及多种抗氧化酶的重要组成成分[31]。半胱胺可以显著提高血浆血红蛋白含量[32]。因此，在育肥猪饲粮中减少 20%矿物质元素含量或补充 CC 对降低组织矿物质元素沉积和维持机体在高温环境下的水盐代谢平衡有改善作用，具体效果需根据不同饲养条件有待进一步探究。

3.3 CC 在饲粮减少矿物质元素条件下对育肥猪粪便矿物质元素排放的影响

解决集约化养猪的畜禽排泄物污染问题已迫在眉睫。排泄物中由于铜、锌等重金属元素在体内利用率极低，造成排泄物中重金属元素超标，污染环境。为减少猪场排泄物对环境的污染，必须从源头上降低重金属排放。动物从饲粮中摄入矿物质元素量的高低直接影响粪便中金属元素的含量[33]。研究发现，从仔猪断奶到出栏阶段，长期饲喂减少矿物质元素的饲粮，粪便中铜、锌、锰元素的含量显著降低[29]。这与本试验结果一致，饲粮减少 20%铜、

铁、锰、锌 4 种矿物质元素含量显著或极显著降低粪便中铜、锌、铅元素的含量，锰元素的含量有降低趋势。因此，通过减少饲粮中矿物质元素的添加量实现减少粪便中矿物质元素的排放量是可行的。

半胱胺作为一种生长促进剂，调节机体内甲状腺素、肾上腺素等调节物质代谢的激素，改善夏季高温条件下营养物质代谢，实现体内营养物质的重新分配，加强物质代谢[34]。半胱胺还可以提高消化酶的活性，提高物质的消化利用率。本研究发现，饲粮补充 CC 显著降低粪便中铅和铜元素的排放量，间接反映了机体对该物质利用率的提高。

4 结 论

①在夏季高温条件下，在饲粮的铜、铁、锰、锌 4 种矿物质元素含量减少 20%条件下补充包膜半胱胺，能在不影响育肥猪后期生长性能和胴体品质的同时，降低肝脏中钾元素含量、肾脏中钠、钙、铅、铜元素含量，并有降低肝脏中锰、锌、铬、钙元素和血清中铬、镁元素含量沉积的趋势。

②在夏季高温条件下，在饲粮的铜、铁、锰、锌 4 种矿物质元素含量减少 20%条件下补充包膜半胱胺，可以维持机体各组织中钠元素的代谢平衡，维持机体电解质平衡。

③在夏季高温条件下，在饲粮的铜、铁、锰、锌 4 种矿物质元素含量减少 20%条件下补充包膜半胱胺，可以减少育肥猪粪便中铅、铜和铬元素的排放量，控制畜禽养殖重金属的污染。

参考文献:

[1] GEORGIEVSKII V I,ANNENKOV B N,SAMOKHIN V T.Mineral nutrition of animals:studies in the agricultural and food sciences[M].Amsterdam:Elsevier,1981.

[2] UNDERWOOD E J.The mineral nutrition of livestock[M].Midlothian:CABI,1999.

[3] MCDOWELL L R.Minerals in animal and human nutrition[M].New York:Academic Press Inc.,1992.

[4] 梁彦英.高铜高锌日粮对仔猪的生产性能、代谢及微量元素沉积的影响[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2011.

[5] 孟祥海.中国畜牧业环境污染防治问题研究[D].博士学位论文.武昌:华中农业大学,2014.

[6] 沈秀丽,杨增玲,韩鲁佳.畜禽粪便引发的重金属污染的研究现状[J].中国农业工程学会2011年学术年会论文集.重庆:中国农业工程学会,2011,

[7] KERSLAKE D M.The stress of hot environments[R].Cambridge:Cambridge University Press,1972.

[8] BALASUBRAMANIAN S,RHO G J.Effect of cysteamine supplementation of *in vitro* matured bovine oocytes on chilling sensitivity and development of embryos[J].Animal Reproduction Science,2007,98(3/4):282–292.

[9] MILLARD W,SAGAR S,MARTIN J.Cysteamine-induced depletion of somatostatin and prolactin[J].Federation Proceedings,1985,44(9):2546–2550.

[10] OKAMURA D M,BAHRAMI N M,REN S Y,et al.Cysteamine modulates oxidative stress and blocks myofibroblast activity in CKD[J].Journal of the American Society of Nephrology,2014,25(1):43–54.

[11] 于炎湖.饲料安全性问题——(3)畜禽日粮中添加高铜、高锌导致的问题及其解决办法[J].养殖与饲料,2003(1):5–6.

[12] 候月卿,沈玉君,刘树庆.我国畜禽粪便重金属污染现状及其钝化措施研究进展[J].中国农业科技导报,2014,16(3):112－118.

[13] GOWANLOCK D,MAHAN D,JOLLIFF J,et al.Evaluating the NRC levels of Cu,Fe,Mn,and Zn using organic minerals for grower-finisher swine[J].Journal of Animal Science,2013,91(12):5680–5686.

[14] 董国忠,李周权,赵建辉,等.饲粮类型和肥育后期不添加维生素和微量矿物元素对猪生长

性能、胴体和肌肉品质、粪中矿物元素排泄的影响(英文)[J].动物营养学报,2007,19(1):1－10.

[15] MAVROMICHALIS I,HANCOCK J D,KIM I H,et al.Effects of omitting vitamin and trace mineral premixes and (or) reducing inorganic phosphorus additions on growth performance,carcass characteristics,and muscle quality in finishing pigs[J].Journal of Animal Science,1999,77(10):2700–2708.

[16] EDMONDS M S,ARENTSON B E.Effect of supplemental vitamins and trace minerals on performance and carcass quality in finishing pigs[J].Journal of Animal Science,2001,79(1):141–147.

[17] MA Y L,LINDEMANN M D,CROMWELL G L,et al.Evaluation of trace mineral source and preharvest deletion of trace minerals from finishing diets for pigs on growth performance,carcass characteristics,and pork quality[J].Journal of Animal Science,2012,90(11):3833–3841.

[18] CHOI S C,CHAE B J,HAN I K.Impacts of dietary vitamins and trace minerals on growth and pork quality in finishing pigs[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2001,14(10):1444–1449.

[19] BARNETT M,HEGARTY R.Cysteamine:a human health dietary additive with potential to improve livestock growth rate and efficiency[J].Animal Production Science,2016,56(8):1330–1338.

[20] MCLEOD K R,HARMON D L,SCHILLO K K,et al.Cysteamine-induced depletion of somatostatin in sheep:time course of depletion and changes in plasma metabolites,insulin,and growth hormone[J].Journal of Animal Science,1995,73(1):77–87.

[21] LIU G M,WEI Y,WANG Z S,et al.Effects of dietary supplementation with cysteamine on

growth hormone receptor and insulin-like growth factor system in finishing pigs[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2008,56(13):5422–5427.

[22] SHELTON J L,SOUTHERN L L,LEMIEUX F M,et al.Effects of microbial phytase,low calcium and phosphorus,and removing the dietary trace mineral premix on carcass traits,pork quality,plasma metabolites,and tissue mineral content in growing-finishing pigs[J].Journal of Animal Science,2004,82(9):2630–2639.

[23] PRASHANTH L,KATTAPAGARI K K,CHITTURI R T,et al.A review on role of essential trace elements in health and disease[J].Journal of Dr NTR University of Health Sciences,2015,4(2):75–85.

[24] ROSE J.Trace elements in health:a review of current issues[M].Boston:Butterworth-Heinemann,2016.

[25] SHAW D T,ROZEBOOM D W,HILL G M,et al.Impact of vitamin and mineral supplement withdrawal and wheat middling inclusion on finishing pig growth performance,fecal mineral concentration,carcass characteristics,and the nutrient content and oxidative stability of pork[J].Journal of Animal Science,2002,80(11):2920–2930.

[26] 文超越,李勇,邢伟刚,等.饲粮减少矿物元素对育肥猪生长性能、肉品质、血清生化指标以及骨骼肌矿物元素含量的影响[J].动物营养学报,2017,29(2):597－604.

[27] BLAKEBOROUGH P,SALTER D N.The intestinal transport of zinc studied using brush-border-membrane vesicles from the piglet[J].British Journal of Nutrition,1987,57(1):45–55.

[28] DANCIS A,HAILE D,YUAN D S,et al.The Saccharomyces cerevisiae copper transport protein (Ctr1p).Biochemical characterization,regulation by copper,and physiologic role in copper uptake[J].Journal of Biological Chemistry,1994,269(41):25660–25667.

[29] CREECH B L,SPEARS J W,FLOWERS W L,et al.Effect of dietary trace mineral concentration and source (inorganic vs.chelated) on performance,mineral status,and fecal mineral excretion in pigs from weaning through finishing[J].Journal of Animal Science,2004,82(7):2140–2147.

[30] DELEUZE S,GOUDET G.Cysteamine supplementation of *in vitro* maturation media:a review[J].Reproduction in Domestic Animals,2010,45(6):e476-e82.

[31] HALLBERG L,HULTHÉN L.Perspectives on iron absorption[J].Blood Cells,Molecules,and Diseases,2002,29(3):562–573.

[32] 王海梅.半胱胺对机体抗氧化能力及血红蛋白含量、铁利用的影响研究[M].硕士学位论文.无锡:江南大学,2006.

[33] LIU Y,MA Y L,ZHAO J M,et al.Digestibility and retention of zinc,copper,manganese,iron,calcium,and phosphorus in pigs fed diets containing inorganic or organic minerals[J].Journal of Animal Science,2014,92(8):3407–3415.

[34] MARGARET C L,CHENG C H K,CHAN K M.Effects of chronic cysteamine treatment on growth enhancement and insulin-like growth factor I and II mRNA levels in common carp tissues[J].British Journal of Nutrition,2006,96(4):650–659.

Effects of Addition of Coated Cysteamine in Reducing Mineral Elements Diet on Growth Performance, Carcass Quality, Tissue Mineral Elements Deposition and Fecal Mineral Elements Excretion of Finishing Pigs

BAI Miaomiao[1,2] LIU Hongnan[2,3*] ZHANG Wanghong[2] ZHANG Xiaofeng[4] XU Kang[2]

DENG Jinping[1] XI Qianyun[1**] YIN Yulong[1,2*]*

(1. *College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*; 2. *Laboratory of Animal Nutritional Physiology and Metabolic Process, Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Hunan Provincial Engineering Research Center of Healthy Livestock, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*; 3. *Hunan Co-Innovation Center of Animal Production Safety, Changsha* 410128, *China*; 4. *Hangzhou King Techina Feed Technology Co., Ltd., Hangzhou* 311107, *China*)

Abstract: This study was conducted to determine the effects of addition of coated cysteamine (CC) in reducing mineral elements [copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn) and zinc (Zn)] diet on growth performance, carcass quality, tissue mineral elements deposition and fecal mineral elements excretion of finishing pigs under high temperature in summer. A total of 360 crossbred (Duroc×Landrace×large white) healthy finishing pigs with average body weight of (103.9±0.7) kg were randomly assigned to 4 groups with 10 replicates per group and 15 pigs per replicate by a 2×2 two factors design. Fact1 was dietary mineral element contents, and or Cu, Fe, Mn and Zn contents were designed as two levels (100% and 80%) of a basal diet; factor 2 was dietary CC (cysteamine content was 27%) content, and were designed as two levels [0 and 1 600 mg/kg (cysteamine content was 300 mg/kg). The trial lasted for 30 d. The results showed as follows: 1) dietary reducing mineral elements or adding CC had no significant effects on growth performance and carcass quality of finishing pigs（P>0.05）. 2) Dietary reducing mineral elements significantly decreased chromium (Cr) content in liver and natrium (Na), calcium (Ca) and and plumbum (Pb)

*Corresponding authors: XI Qianyun, professor, E-mail:xqy0228@163.com; YIN Yulong, professor, E-mail: yinyulong@isa.ac.cn (责任编辑　王智航)

contents in kidney (P<0.05), but significantly increased Na content in serum (P<0.05). The addition of CC in reducing mineral elements diet significantly decreased kalium （K） content in liver and Na, Ca, Pb and Cu contents in kidney (P<0.05), tended to decreased Mn, Zn, Cr and Ca contents in liver and Cr and Mn contents in serum (0.05≤P<0.10), and was benefit to maintaining Na balance in body tissues. 3) Dietary reducing mineral elements or adding CC significantly decreased Cu and Pb excretions in feces （P<0.01）. Dietary reducing mineral elements significantly decreased fecal Zn excretion (P<0.05), but significantly increased magnesium (Mg) excretion (P<0.05). The addition of CC in reducing mineral elements diet tended to decreased fecal Cr excretion (0.05≤P<0.10). In conclusion, in summer at high temperature, under the condition of reducing 20% Cu, Fe, Mn and Zn contents in diet, the addition of 1 600 mg/kg CC decreases mineral deposition in serum, liver and kidney, decreases fecal Pb, Cu and Cr mineral excretions, and maintains the electrolyte balance without negative effects on growth performance of finishing pigs.

Key words: mineral elements; coated cysteamine; finishing pigs; growth performance; deposition; excretion